

Все металлургические шлаки содержат, помимо железа, значительные количества соединений фосфора и СаО, а также другие элементы, используемые в сельском хозяйстве в качестве удобрений. До 1975 г. основная масса шлаков ( $\approx 87,6\%$ ) направлялась в отвалы.

Кроме шлаков ежегодно образуется около 1 млн. т шламов, которые содержат большое количество железа ( $\sim 50\%$ ), и  $\sim 110$  тыс. т пыли.

Как уже было сказано, твердые отходы занимают полезные площади. Из-за ветров происходит постоянное пыление отвалов, что приводит к загрязнению воздушного бассейна. Осадки (дожди, снег) выщелачивают из отвалов элементы и соединения, что приводит к заражению почвы. В итоге, даже освобожденные из-под отвалов земли становятся непригодными для сельскохозяйственного использования, образуются так называемые «индустриальные пустыни».

Таким образом, техногенные отходы, накопленные в России за многие десятилетия, с одной стороны, представляют резервную материальную базу (неиспользуемую должным образом), а с другой стороны – очевидный источник экологического неблагополучия. Современная экологическая идеология в нашей стране предусматривает предупреждение экологических нарушений, а не нейтрализацию их последствий. Эта идеология инновационного развития представляется актуальным и продуктивным направлением консолидации усилий науки, бизнеса и власти в целях сбережения народа и сбалансированного развития недропользования и новых территорий.

### **Список использованных источников**

1. База данных Росстата. Электронный ресурс. Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/oxrana/tabl/oxr\\_otxod1.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tabl/oxr_otxod1.htm).

2. Большина Е.П. Экология металлургического производства: курс лекций. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012. – 155 с.

УДК 669.1.022; 622.7:669.1

**Л. А. Зайнуллин<sup>1,2</sup>, В. Г. Карелин<sup>1</sup>, А. Ю. Епишин<sup>1</sup>, Т. Белхайт<sup>3</sup>, Е. К. Курт<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Societe Nationale du Fer et de l'Acier FERAAL Spa, directeur technique, Algeria

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНЕТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ ПЕРЕД ОБОГАЩЕНИЕМ И ДЕФОСФОРАЦИЕЙ**

### **Аннотация**

*В мире достаточно много месторождений железной руды с повышенным (0,75 %) содержанием фосфора, что является препятствием для вовлечения их в производство. Исследование*

удаления вредных примесей из таких железных руд имеет большую перспективу. На экспериментальной базе ОАО «ВНИИМТ» исследована технология дефосфорации, при которой после предварительного магнетизирующего обжига и последующего обесфосфоривания железной руды водным раствором серной кислоты наблюдали наименьшее остаточное содержание фосфора в концентрате. Исследовано влияние температуры и длительности выдержки магнетизирующего обжига на содержание железа и остаточное содержание фосфора в обесфосфоренном концентрате. Также исследовано влияние удельного расхода твердого восстановителя (бурого угля) на качество магнетитового концентрата. Исходя из результатов эксперимента, выбраны оптимальные технологические параметры магнетизирующего обжига железной руды перед обогащением и последующей дефосфорацией.

**Ключевые слова:** магнетизирующий обжиг, обогащение, дефосфорация, исследование, вращающаяся печь, оптимальные технологические параметры, содержание железа, остаточное содержание фосфора.

#### Abstract

*There are quite a lot of iron ore deposits in the world with increased (0.75%) phosphorus content, which is an obstacle to their involving in production. Research of removal of detrimental impurities from such iron ores has a great prospect [1-6]. On the experimental base of OJSC VNIIMT it was studied dephosphorizing technology at which after preliminary magnetizing roasting and subsequent dephosphorization of iron ore with aqueous solution of sulfuric acid the least residual phosphorus content in concentrate was observed. Research of influence of temperature and duration of magnetizing roasting on iron content and residual phosphorus content in dephosphorized concentrate was studied. The influence of specific consumption of solid reductant (brown coal) on the quality of magnetite concentrate was also studied. Based on the results of the experiment, the optimal technological parameters of magnetizing roasting of iron ore before beneficiation and subsequent dephosphorization were selected.*

**Key words:** magnetizing roasting, beneficiation, dephosphorizing, research, rotary furnace, optimal process parameters, iron content, residual phosphorus content.

Алжирская Народная Демократическая Республика одна из крупнейших стран Африки по запасам полезных ископаемых. По запасам железных руд эта страна находится на 2-м месте в Африке. В южной провинции Тиндуф выявлены крупнейшие в Алжире девонские осадочные месторождения оолитовых железных руд – Гара-Джебилет (Gara Djebilet), общие запасы которых более 2-х млрд. тонн, с содержанием 52,1 % Fe<sub>общ</sub>, 12,1 % FeO, 0,75 % P и 6,29 ПМПП. Добыча руды осуществляется открытым способом, что обеспечивает более дешевую разработку месторождения. Но наряду с этим существует проблема трудности обогащения руд и сложности их комплексного использования из-за высокого содержания фосфора (до 0,75–1,0 %). Алжирская компания "Feraal Spa" намерена разрабатывать это перспективное месторождение. В связи с этим актуальным является проведение лабораторных исследований с целью определения и тестирования эффективного процесса переработки алжирской железной руды с получением максимально возможного обогащения сырья по содержанию железа посредством высокотемпературного магнетизирующего обжига и максимально возможного снижения содержания фосфора в конечном продукте после стадии сернокислотного выщелачивания.

Для достижения цели настоящего исследования необходимо решение следующих задач:

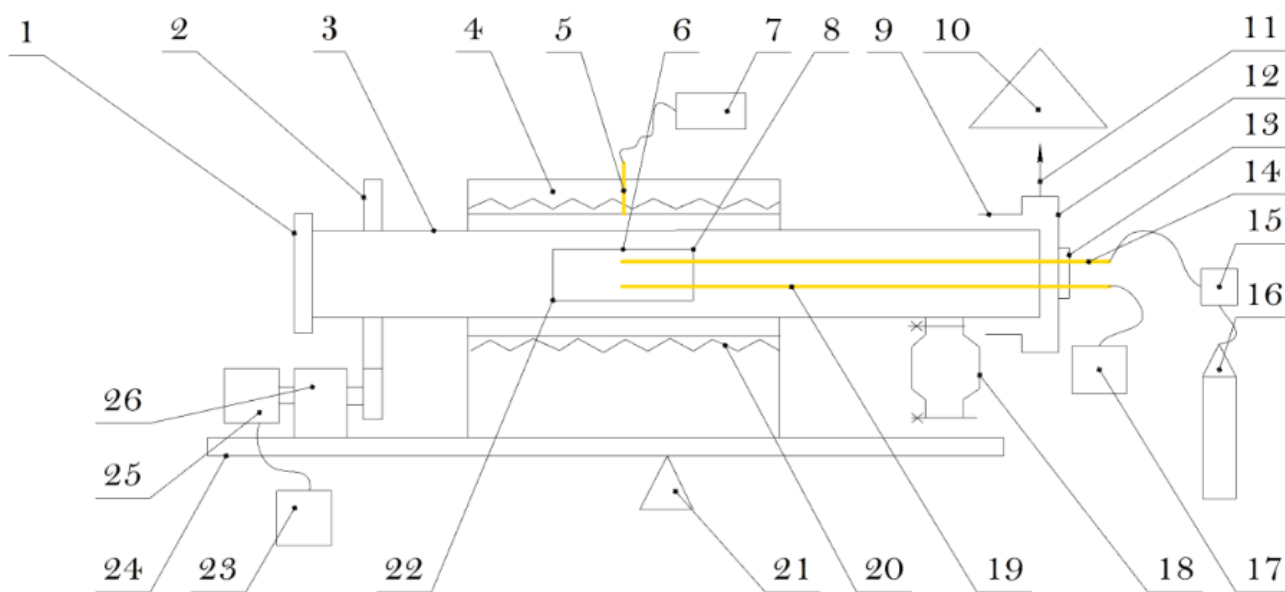
1. Разработать методику и оборудование для проведения лабораторного эксперимента при различных условиях высокотемпературного магнетизирующего обжига алжирской железной руды;

2. Исходя из результатов эксперимента, выбрать оптимальные технологические параметры магнетирующего обжига железной руды перед обогащением и последующим обесфосфориванием.

Исследования технологии высокотемпературного магнетирующего обжига железной руды проводились на экспериментальной базе ОАО «ВНИИМТ» с использованием лабораторной обжиговой установки. Общий вид установки представлен на рисунке 1.

Для определения оптимальных параметров магнетирующего обжига алжирского железорудного сырья экспериментальным путем подбирали такую температуру прокаливания, при которой на последующих технологических этапах, после магнитной сепарации и обесфосфоривания, остаточное содержание фосфора в концентрате составило наименьшую величину, а содержание железа наибольшую. Таким образом, высокотемпературный магнетирующий обжиг железной руды проводили по следующему температурному режиму:

- нагрев материала до заданной температуры с одинаковой скоростью в каждом эксперименте;
- выдержка в течение заданного времени при данной температуре;
- охлаждение концентрата до комнатной температуры для последующего технологического процесса без доступа кислорода чтобы не допустить вторичное окисление.



- 1 – крышка; 2 – шестерня; 3 – труба; 4 – силовая печь; 5 – термопара;  
6 – реакционный стакан; 7 – блок регулирования температуры;  
8 – открытый торец реакционного стакана; 9 – резиновое уплотнение;  
10 – вытяжка; 11 – штуцер отвода газа; 12 – загрузочно-разгрузочная головка;  
13 – крышка; 14 – трубка для подачи газа; 15 – расходомер газа;  
16 – баллон с инертным газом; 17 – потенциометр; 18 – холодильник;  
19 – термопара; 20 – карбидкремниевые нагреватели; 21 – опора;  
22 – закрытый торец реакционного стакана; 23 – блок регулирования вращения трубы; 24 – поворотная плита; 25 – электродвигатель; 26 – редуктор

Рис. 1. Схема лабораторной вращающейся печи

В первой серии опытов производили поиск оптимальной температуры обжига железной руды, при которой остаточное содержание фосфора в концентрате после выщелачивания составит наименьшее значение. Магнетизирующий обжиг руды проводили при различных температурах в диапазоне от 750 °С до 1000 °С. После высокотемпературной обработки в лабораторной печи железную руду измельчали до крупности минус 0,071 мм и обесфосфоривали слабым водным раствором серной кислоты. Время магнетизирующего обжига равное 120-ти минутам взяли с запасом, чтобы избежать вероятной погрешности в конечном результате. Обесфосфоривание производили в равных условиях для каждого опыта. При температуре 1000 °С (опыт 5) наблюдаются следы спекания рудных частиц. Такой режим обжига сложно реализовать в промышленном масштабе. Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние температуры магнетизирующего обжига на содержание фосфора и железа в обесфосфоренном концентрате

№ n/n	Обжиг	Магнетитовый концентрат		Обесфосфоривание		Обесфосфоренный концентрат	
		Крупность, мм	Содержание, %			Содержание, %	
			Fe	P		Fe	P
1	$t_{\text{обж}} = 750^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}} = 120''$	–0,071	63,1	0,50	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}} = 120''$ , $t_{\text{раст}} = 65^{\circ}\text{C}$	63,1	0,24
2	$t_{\text{обж}} = 850^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}} = 120''$	–0,071	63,6	0,56	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}} = 120''$ , $t_{\text{раст}} = 65^{\circ}\text{C}$	64,7	0,19
3	$t_{\text{обж}} = 900^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}} = 120''$	–0,071	63,6	0,55	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}} = 120''$ , $t_{\text{раст}} = 65^{\circ}\text{C}$	65,3	0,16
4	$t_{\text{обж}} = 950^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}} = 80''$	–0,071	61,7	0,54	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}} = 120''$ , $t_{\text{раст}} = 65^{\circ}\text{C}$	63,8	0,17
5	$t_{\text{обж}} = 1000^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}} = 60''$	—	—	—	—	—	—
Обозначения: $t_{\text{обж}}$ – температура обжига руды; $\tau_{\text{обж}}$ – время выдержки руды; $t_{\text{раст}}$ – температура пульпы (раствор + руда); $\tau_{\text{выщ}}$ – время обесфосфоривания; Т – твердая фаза (руда); Ж – водный раствор серной кислоты; C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – концентрация серной кислоты в водном растворе.							

Как видно из таблицы 1 при температуре обжига 900 °С (опыт 3) в обесфосфоренном концентрате наблюдается наилучший результат, в котором содержание железа равно 65,3 %, а содержание остаточного фосфора равно 0,16 %. В опытах 1,2,4

при температурах обжига 750, 850 и 950 °С соответственно остаточное содержание фосфора выше, чем при 900 °С (опыт 3), также при температуре обжига 950 °С (опыт 4) уже проявляются признаки спекания частиц материала. В соответствии с результатами опытов магнетизирующего обжига в качестве оптимальной температуры принимаем 900 °С.

В следующей серии опытов определяли оптимальную длительность магнетизирующего обжига руды перед стадиями обогащения и обесфосфоривания. Обжиг проводили при оптимальной температуре 900 °С, полученной экспериментальным путем. Крупность магнетитового концентрата и технологические параметры сернокислотного обесфосфоривания остаются теми же, как и в предыдущих опытах. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние длительности магнетизирующего обжига на содержание фосфора и железа в обесфосфоренном концентрате

№ n/n	Обжиг	Магнетитовый концентрат			Обесфосфоривание	Обесфосфоренный концентрат	
		Крупность, мм	Содержание, %			Содержание, %	
			Fe	P		Fe	P
6	$t_{\text{обж}}=900^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}}=20''$	−0,071	61,4	0,60	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}}=120''$ , $t_{\text{раст}}=65^{\circ}\text{C}$	64,8	0,25
7	$t_{\text{обж}}=900^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}}=40''$	−0,071	61,7	0,54	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}}=120''$ , $t_{\text{раст}}=65^{\circ}\text{C}$	64,4	0,19
8	$t_{\text{обж}}=900^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}}=80''$	−0,071	61,9	0,60	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}}=120''$ , $t_{\text{раст}}=65^{\circ}\text{C}$	65,8	0,20
9	$t_{\text{обж}}=900^{\circ}\text{C}$ , $\tau_{\text{обж}}=120''$	−0,071	—	—	T:Ж=1:2, C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =20 г/100 г Т, $\tau_{\text{выщ}}=120''$ , $t_{\text{раст}}=65^{\circ}\text{C}$	65,3	0,16
Обозначения: $t_{\text{обж}}$ – температура обжига руды; $\tau_{\text{обж}}$ – время выдержки руды; $t_{\text{раст}}$ – температура пульпы (раствор + руда); $\tau_{\text{выщ}}$ – время обесфосфоривания; Т – твердая фаза (руда); Ж – водный раствор серной кислоты; C H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – концентрация серной кислоты в водном растворе.							

Как видно из таблицы 2 при температуре обжига 900 °С и длительности обжига 20–120 минут содержание железа в обесфосфоренном концентрате составляет 64,4–65,8 %. Остаточное содержание фосфора в обесфосфоренном концентрате при длительности обжига 40–120 минут колеблется в диапазоне от 0,16 до 0,20 %. Установлено, что длительности обжига железной руды 20 минут недостаточно, поскольку остаточное содержание фосфора, равное 0,25 %, больше, чем в опытах с

более длительной выдержкой руды. Таким образом, анализируя данные с таблицы 2, в качестве оптимальной длительности обжига принято время 40 минут.

Также в лабораторной вращающейся печи провели серию опытов магнетизирующего обжига железной руды с разным удельным расходом твердого восстановителя (угля), в интервале от 1,0 до 3,0 %. Восстановительный обжиг железной руды с использованием твердого восстановителя представлен в таблице 3.

Таблица 3

Влияние удельного расхода твердого восстановителя  
на качество магнетитового концентрата

№ п/п	Обжиг			Обоженная руда	
	Температура, °С	Время, мин	Удельный расход угля, %	Содержание, %	
				Fe <sub>общ</sub>	FeO
10	—	—	—	52,1	12,1
11	t <sub>обж</sub> = 900	τ <sub>обж</sub> = 40''	1,0	57,7	30,9
12	t <sub>обж</sub> = 900	τ <sub>обж</sub> = 40''	1,5	58,1	38,2
13	t <sub>обж</sub> = 900	τ <sub>обж</sub> = 40''	2,0	57,9	43,9
14	t <sub>обж</sub> = 900	τ <sub>обж</sub> = 40''	3,0	58,2	55,6
Обозначения: t <sub>обж</sub> – температура обжига руды; τ <sub>обж</sub> – время выдержки руды.					

Обжиг железной руды в крупности 2–0 мм производили при оптимальных технологических параметрах: температуре 900 °С и выдержке 40 минут. В качестве твердого восстановителя использовали бурый уголь, предварительно прокаленный с целью удаления основной массы летучих компонентов.

Из данных таблицы 3 видно, что с увеличением удельного расхода угля от 1,0 до 3,0 % наблюдается значительное увеличение монооксида железа FeO в обожженном концентрате по отношению к необработанной исходной железной руде (от 30,9 до 55,6 % соответственно). Доля железа общего Fe<sub>общ</sub> в обожженном концентрате при удельном расходе угля от 1,0 до 3,0 % практически не изменяется и колеблется в диапазоне от 57,7 до 58,2 %. В связи с этим удельный расход угля 1,0 % (по отношению к массе пробы руды) принят за оптимальный, поскольку его достаточно для полного восстановления оксидов железа в руде до магнетита.

*Выводы.* На экспериментальной базе ОАО «ВНИИМТ» были проведены опыты по высокотемпературному обжигу железной руды с использованием лабораторной обжиговой установки «вращающаяся печь». Для железной руды месторождения Gara Djebilet предварительный обжиг должен быть магнетизирующим, чтобы не только обеспечить термообработку, необходимую для последующего обесфосфоривания, но и перевести окисленные формы железосодержащих минералов в магнетит. В результате проведенных исследований были определены оптимальные технологические параметры высокотемпературного магнетизирующего обжига, при которых после процесса обесфосфоривания содержание железа в концентрате возрастало от исходного 52,1 % до 64,0–65,3 %, а остаточное содержание фосфора в концентрате снижалось от исходного 0,75 % до 0,16–0,20 %.

Основные технологические параметры магнетизирующего обжига железной руды:

1. В серии опытов с разной температурой обжига (750–1000 °С) показано, что оптимальная температура обжига составляет  $900 \pm (5-10)$  °С. При этом в обесфосфоренном концентрате содержание железа составило 65,3 %, а остаточное содержание фосфора составило 0,16 %.

2. В серии опытов с различной длительностью обжига железной руды показано, что оптимальная длительность обжига составляет 40 минут. При такой длительности высокотемпературной обработки после процесса обесфосфоривания получен концентрат с содержанием железа 64,4 % и остаточным содержанием фосфора 0,19 %.

3. Проведен опыт по магнетизирующему обжигу железной руды с использованием твердого восстановителя (бурого угля). В этих опытах установлено, что удельный расход угля 1,0 % достаточен для восстановления окисленных железорудных минералов до магнетита. В результате был получен обожженный концентрат с содержанием общего железа в руде 57,7 % и содержанием монооксида железа 30,9 %.

### **Список использованных источников**

1. Беликов В.В., Огородов В.Б., Ядрышников А.О. [и др.]. Способ очистки железорудного концентрата от примесей фосфора. – Патент РФ, №2184158, 27.06.2002.

2. Кинетика высокотемпературной дегидратации лисаковского железорудного концентрата / В.Г. Карелин, Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 8. С. 656-661.

3. Епишин А.Ю., Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г. О дефосфорации лисаковского бурого железняка методов выщелачивания с предварительным обжигом // Сборник материалов VIII конгресса обогатителей стран СНГ. Москва, 2011. Т. I. С. 83-86.

4. Karelin V.G., Zainulin L.A., Epishin A.Y., Artov D.A. The modern Techniques of Involvement of Phosphorous // Containing Sedimentary Production. The 12<sup>th</sup> China-Russia symposium on Advanced Materials and Technologies, Kuming, 2013, p.388-391.

5. Карелин В.Г., Зайнуллин В.Г., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Комбинированная пиро-гидрометаллургическая технология обесфосфоривания бурого железняка Лисаковского месторождения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 2. С. 10-15.

6. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Особенности пиро-гидрометаллургической технологии обесфосфоривания бурого железняка Лисаковского месторождения // Сталь. 2015. № 3. С. 8-11.